©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

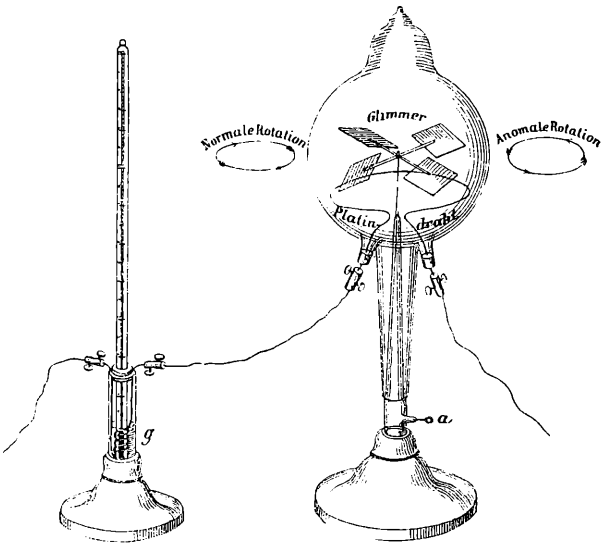
Beitrag zur Erklärung des Zöllner'schen Radiometers.

Von **J. Puluj,**
Privat-Docent und Assistent am physikalischen Cabinete der Wiener Universität.

(Mit 5 Holzschnitten.)

Herr F. Zöllner beschreibt in der dritten Abhandlung seiner „Untersuchungen über die Bewegung strahlender und bestrahlter Körper“ [1] ein sinnreich construirtes Radiometer, dessen sonderbare Bewegungserscheinungen bisher nicht erklärt worden sind. Der Apparat besteht aus einem beweglichen Kreuz mit ungeschwärzten Glimmerblättchen, welche wie in der Fig. 1 dargestellt ist, gegen den Horizont schräg geneigt sind. Unter dem Kreuz ist ein horizontal liegender Ring von Platindraht angebracht und seine Enden in die Glaswand eingeschmolzen, um einen galvanischen Strom hindurchleiten zu können.

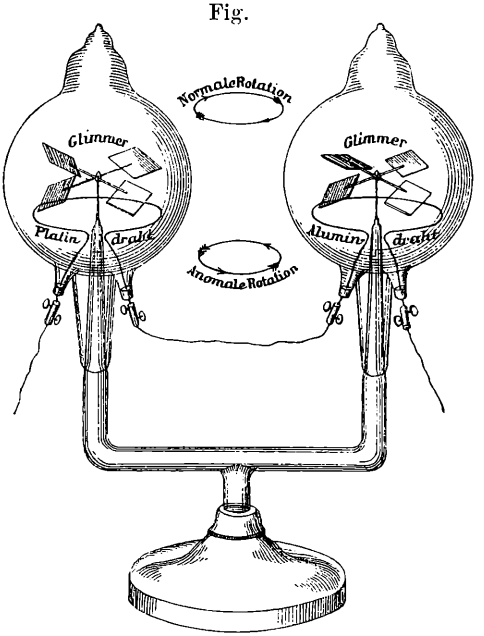
Fig. 2. Fig. 1.



[1] Pogg. Ann. Bd. 160, pag. 460.

Die Temperaturerhöhung des Platindrahtes wurde näherungsweise durch ein in Fünftelgrade C. getheiltes Thermometer bestimmt, um dessen Quecksilbergefäss ein Platindraht von derselben Dicke wie in dem betreffenden Radiometer in einer dicht anschliessenden Spirale von mehrfachen Windungen geführt war. Das Thermometer wurde dann in ein Gefäss gesetzt, in dem sich eine nicht leitende Flüssigkeit befand, z. B. Copallack, welche die Drahtspirale umspülte. Fig. 2.

Fig.



Mit einem Apparate mit zwei communicirenden Radiometergefässen, Fig. 3, welche mit einem Aluminium- und Platinring versehen waren, wurden bei einer galvanischen Temperaturerhöhung des Drahtes von höchstens 10° C., unter verschiedenen Druckverhältnissen des Gases im Inneren der Gefässe, folgende Erscheinungen beobachtet.

1. Bei gewöhnlichem Barometerdruck von 760^{mm} fand eine normale Rotation statt, d. h. eine solche, wie sie durch erwärmte, vom Drahte aufsteigende Luftströme erklärt werden können.

2. Bei stetiger Verminderung des Druckes trat bei ungefähr 100^{mm} ein Wendepunkt ein, indem sich die Rotation mit abnehmender Geschwindigkeit bis zum Stillstande bei diesem Druck verlangsamte.

3. Bei niedrigeren Druckwerthen als 10^{mm} stellte sich eine anomale Rotation nach der entgegengesetzten Richtung ein, d. h. eine solche, welche durch Aufsaugung des Gases durch die erwärmten Drähte, sowohl Aluminium- als Platindraht erklärt werden könnte.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

4. Diese anomale Rotation blieb unverändert bis zu Druckwerthen, welche barometrisch nicht mehr gemessen werden konnten, und bei welchen, wie es schien, ein mit der Pumpe gleichzeitig in Verbindung gesetztes gewöhnliches Radiometer, bereits den Punkt seiner grössten Empfindlichkeit überschritten hatte.

5. Bei fortgesetzter Evacuation tritt fast plötzlich wieder die normale Rotation ein, jedoch mit einer solchen Geschwindigkeit, dass man nicht mehr die einzelnen Theile des rotirenden Kreuzes zu erkennen im Stande ist. Hr. Zöllner hat bei den empfindlichsten Radiometern, selbst bei der kräftigsten Bestrahlung durch die Sonne, niemals auch nur entfernt solche Rotationsgeschwindigkeiten beobachtet. Die galvanische Erwärmung des Drahtes braucht hierbei nur 2°—3° zu betragen. Der Eintritt der Wendepunkte scheint näherungsweise beim Platindraht und Aluminiumdraht gleichzeitig einzutreten.

Alle diese Versuche gelingen mutatis mutandis auch dann, wenn die Drehungen über statt unter dem beweglichen Kreuze angebracht sind.

Wenn die Gefässe bei diesem geringen Drucke des eingeschlossenen Gases abgeschmolzen werden, so findet unter denselben Bedingungen die normale Rotation bei der galvanischen Erwärmung der Drähte gleichfalls statt. Die Geschwindigkeit der Rotation nimmt indessen fortwährend ab, bis nach 8—10 Tagen selbst bei einer Erwärmung bis zum Glühen Stillstand eintritt, der sich später in die anormale Rotation verwandelt, welche Änderungen nur durch allmälige Druckvergrösserungen im Inneren des Gefässes herbeigeführt werden.

Interessant ist noch ein Versuch, den Herr Zöllner gemacht hat, indem er das Radiometer einfach in das volle Sonnenlicht stellte. Es fand eine normale Rotation statt, auch wenn sich der Druck soweit vergrössert hat, dass bei der galvanischen Erwärmung des Drahtes die anormale Rotation eintrat.

Aus diesem Versuche folgert Herr Zöllner, dass der galvanische Strom nicht nur durch die von ihm in dem Draht erzeugte Erwärmung auf die Glimmerscheibe wirkt, sondern dass diesem Strom eine specifische Wirkung auf das umgebende gasförmige Medium zugeschrieben werden muss, welche entgegengesetzt der durch Temperaturerhöhung erzeugten Wirkung ist. Diese Wirkung

könnte nach Zöllner durch eine Resorption des umgebenden Gases erklärt werden.

Für die Existenz solcher Absorptionsprocesse wird noch folgende Beobachtung angeführt. Es wurde der in Fig. 3 dargestellte Doppelapparat, nachdem er während einer der normalen Rotation entsprechenden Verdünnung abgeschmolzen war, zwischen das Doppelfenster des Arbeitszimmers gestellt. Während einige Tage seit dem Abschmelzen bereits eine Verminderung der normalen Rotationsgeschwindigkeit eingetreten, wurde eines Abends beim Mondschein eine langsame Rotation in anormaler Richtung beobachtet. Diese Rotation wurde seitdem des Nachts auch ohne Mondschein während eines Zeitraumes von vier Wochen beobachtet. Auch des Tags bei dicht bedecktem Himmel fand diese Rotation statt, während bei heller Beleuchtung ein Stillstand eintrat, der sich bei Bestrahlung durch die Sonne in eine normale Rotation verwandelte. Diese Eigenschaft hat sich jedoch nach und nach verloren.

In der Abhandlung wird noch eines Umstandes in Kürze gedacht. Herr Zöllner vermuthete, dass die Erscheinung mit einer Ausstrahlung gegen den Himmelsraum im Zusammenhange stehe und öffnete daher zur Vergrösserung dieser Ausstrahlung das äussere Fenster, während das innere wieder geschlossen wurde. Die eintretende Wirkung war die entgegengesetzte von der erwarteten; die Bewegung hörte nach Verlauf einer halben Minute vollständig auf. Sobald aber das äussere Doppelfenster wieder geschlossen wurde, stellte sich auch wieder die anormale Rotation ein. Diese Versuche wiederholte Zöllner sehr oft mit gleichem Erfolge und zeigte dieselben seinen Freunden.

Während ich eine Vorlesung über „strahlende Elektrodenmaterie“ im naturwissenschaftlichen Vereine hielt, bemerkte ich, dass das Rädchen in einem Zöllner'schen Radiometer von der in Fig. 1 dargestellten Form in anormaler Richtung sich drehte und zwar bei einem Verdünnungsgrade, bei welchem in Folge galvanischer Erwärmung oder Emission von strahlender Elektrodenmaterie, zu welchem Zwecke in das Radiometer bei *a*, Fig 1, noch eine Elektrode eingeschmolzen wurde, die normale Rotation stattfand. Ich dachte gleich an den Mondschein beim Zöllner'schen Versuche und es schien mir höchst wahrscheinlich zu sein, dass

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

die Ursache dieser räthselhaften Bewegung von der Bestrahlung durch eine Reihe von Gasflammen herrühren könnte, welche in einer Entfernung von ungefähr drei Metern vom Experimentirtische fast an der Decke im Vorlesungssaale angebracht waren.

Ich vermuthete, dass eine Beleuchtung des Radiometers von unten eine entgegengesetzte Bewegung veranlassen würde. Der Versuch wurde nachher mit einem Schmetterlingsbrenner ausgeführt und meine Vermuthung bestätigte sich. Befand sich die Flamme vertical oder schief über dem Apparate, so war die Rotation in anormaler Richtung und verwandelte sich in eine entgegengesetzte normale Richtung, wenn die Flamme unterhalb des Apparates aufgestellt wurde.

Wenn ferner das Gefäss des Apparates oben mit in Äther getränktem Fliesspapier bedeckt und auf diese Weise abgekühlt und unterhalb des Kreuzes durch Berührung mit der Hand noch erwärmt wird, so stellt sich ebenfalls eine sehr lebhafte Rotation in anormaler Richtung her. Eine entgegengesetzte Drehung findet bei der Abkühlung des unteren und Erwärmung des oberen Glasgefässes statt.

An einem Vormittage beobachtete ich an demselben Apparate eine Drehung in anormaler Richtung, wiewohl in das Zimmer keine Sonnenstrahlen gelangten und der Apparat nur im diffusen Lichte in der Nähe des Fensters stand. Nachmittags trat Stillstand ein.

Es lag die Vermuthung nahe, dass die Ursache dieser Bewegung die Ausstrahlung vom Plafond des Arbeitszimmers war, welcher Vormittags gegen den Boden verhältnissmässig wärmer als Nachmittags war.

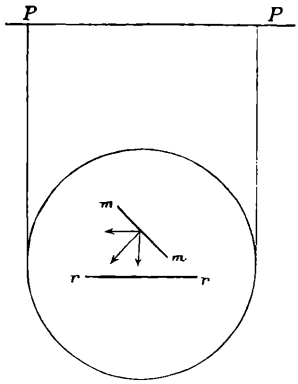
Ich machte einen Versuch mit heissen Kupferplatten, indem ich dieselben in einer Entfernung von ungefähr einem Meter oberhalb oder unterhalb des Radiometers horizontal aufstellte. Es ergab sich das Resultat, dass Wärme- und Lichtstrahlen dieselbe Rotation veranlassen, eine anormale bei Bestrahlung des Gefässes von oben und eine normale bei Bestrahlung von unten.

Ich wiederholte auch den Zöllner'schen Versuch, indem ich das Radiometer direct in das Sonnenlicht stellte. Das Kreuz rotirte in normaler Richtung, als ich jedoch ein Bündel Sonnenstrahlen, welches durch ein rundes Loch von ungefähr 7 Ctm.

Durchmesser in das Arbeitszimmer hereingelassen wurde, von oben auf das Radiometer fallen liess, drehte sich das Kreuz ebenso wie vom Gaslichte und den Wärmestrahlen in anormaler Richtung und kehrte in die normale Richtung um, sobald das Strahlenbündel mittelst eines Spiegels auf den unteren Theil des Apparates gerichtet wurde.

Diese, sowie die von Herrn Zöllner gemachten radiometrischen Versuche bei grosser Verdünnung (0·02 Mm. Quecksilberdruck) lassen sich auf folgende Weise erklären.

Fig. 4.



Befindet sich die heisse Metallplatte *PP* (Fig. 4) über dem kugelförmigen Apparate, so wird nur die obere Hälfte desselben von Wärmestrahlen getroffen und erwärmt. Die nebenstehende Figur stellt einen Durchschnitt des Glasgefässes mit der Verticalebene dar, welche den Platinring tangirt; *rr* ist ein Stück des Platinringes und *mm* der Querschnitt des schräg gestellten Glimmerblättchens mit jener Verticalebene.

Die an die obere Glaswand anprallenden Gasmoleküle entfernen sich von derselben mit grösseren Geschwindigkeiten und übertragen durch Stösse einen Theil ihrer lebendigen Kraft an den Flügel *mm*, welcher in Folge dessen einen Überdruck normal zur Fläche erfahren wird. Die verticale Componente dieses Druckes wird durch die Spitze aufgehoben, während die zweite zum Ring parallele Componente den Flügel in anormaler Richtung treibt, wie sich aus der Zeichnung ergibt.

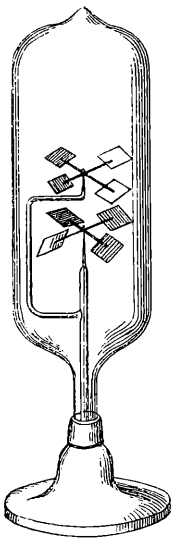
Es ist leicht einzusehen, dass wenn die Platte unterhalb des Apparates aufgestellt ist, die Blättchen einen von unten nach oben gegen die Fläche normal gerichteten Überdruck erfahren werden, und dass daher die Bewegung umkehren muss.

Für den Zöllner'schen Versuch beim Mondschein ergibt sich daraus folgende Erklärung. Die Bewegung wurde theilweise durch das schwache Mondlicht, hauptsächlich aber durch die Wärme verursacht, welche vom oberen Theil des Doppel-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

fensters stärker als vom unteren ausgestrahlt wurde. Beim offenen Fenster hat sich die Temperatur im ganzen Raum des Doppelfensters ausgeglichen und es trat in der Bewegung ein Stillstand ein. Die stärkere Wärmestrahlung von oben war die Ursache der anormalen Bewegung, welche von Herrn Zöllner auch ohne Mondschein und von mir am Vormittage im geheizten Zimmer beobachtet wurde. Nachmittags hat sich die Temperatur ausgeglichen und der geringe Temperaturunterschied der Decke und des Bodens konnte die Bewegungswiderstände nicht überwinden. Der Drahtring ist für diese Versuche von untergeordneter Bedeutung; er wird die Bewegung etwas schwächen oder verstärken, je nachdem die Bestrahlung von oben oder von unten geschieht. Dass diese Versuche auch ohne Drahtring gelingen müssen, folgt aus der gegebenen Erklärung. Auch habe ich derartige Versuche mit Erfolg gemacht, und zwar mit dem in Fig. 5 dargestellten Apparate.

Fig. 5.



Je nachdem derselbe mit der Hand oberhalb oder unterhalb der Kreuze, von dem das untere auf seiner oberen Seite geschwärzt ist, erwärmt wird, rotiren beide Kreuze in anormaler oder normaler Richtung. Dass ein Kreuz genügt, ist selbstverständlich.

Wird der Apparat leuchtenden Strahlen ausgesetzt, und zwar so, dass dieselben von oben auf den Apparat fallen, so gehen die Lichtstrahlen durch die Glaswände und treffen die oberen Flächen der Glimmerblättchen und da letztere die Wärme schlecht leiten, so werden die Glimmerblättchen an der bestrahlten Seite wärmer sein, als an der beschatteten Seite. Aus der Reaction der anprallenden Gasmoleküle resultirt daher ein normal gegen die Blättchen von oben nach unten gerichteter Überdruck, welcher die Blättchen in anormaler Richtung dreht. Bei der Beleuchtung des Apparates von unten kehren sich die Verhältnisse und die Drehungsrichtung um.

Wird der Apparat ohne Drahtring in das volle Sonnenlicht gestellt, so halten sich beide Wirkungen mehr weniger das Gleichgewicht und wenn auch die Bestrahlung von oben etwas stärker sein wird, so genügt diese geringe Differenz in der Bestrahlung nicht, um die Bewegungswiderstände zu überwinden; ein solcher Apparat im vollen Sonnenlichte muss daher stillstehen.

Diesen Versuch hat auch bereits Herr Zöllner gemacht.[1] In der ersten Abhandlung seiner Untersuchungen bemerkt er zu einem Apparate, in welchem unter dem Kreuze statt des Platinringes eine Scheibe aus Aluminiumblech angebracht war, Folgendes: „Das soeben beschriebene Kreuz zeigt für sich allein in derselben Weise wie die Radiometerkreuze in einem Glasgefäss eingeschlossen, selbst im hellen Sonnenschein keine rotirende Bewegung. Wird jedoch möglichst nahe unterhalb desselben eine Scheibe von blankem Aluminiumblech angebracht, so rotirt das Kreuz selbst bei dicht bedecktem Himmel fast ebenso schnell wie die empfindlichsten der bisher von mir beobachteten Radiometer. Der Sinn der Rotation entspricht einer Emission von der Metallfläche aus."

Befindet sich unter dem Kreuz ein Drahtring, so erwärmt er sich im vollen Sonnenlichte und die von demselben mit grösserer Geschwindigkeit zurückprallenden Gasmoleküle übertragen einen Theil ihrer lebendigen Kraft an die Glimmerblättchen, und veranlassen eine Drehung derselben in normaler Richtung.

Es möge hier noch der Versuch einer Erklärung der Bewegungserscheinungen im Zöllner'schen Radiometer, wenn der Platinring von einem galvanischen Strome durchflossen wird, Platz finden.

Dass die Bewegung in normaler Richtung beim vollen Atmosphärendruck durch Luftströmungen, die durch den erwärmten Draht entstehen, veranlasst werden, darüber wird wohl niemand zweifeln, dagegen scheint mir die Ansicht des Herrn Zöllner, dass die anormale Bewegung bei kleineren Druckwerthen als 10 Mm. durch Resorption des Wasserstoffes durch den Platinring erklärt werden könnte, schon desshalb wenig Wahrscheinlichkeit

[1] Pogg. Ann. Bd. 160. pag. 166.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

zu besitzen, weil diese Umkehrung auch beim Aluminiumring, welcher Wasserstoff gewiss nur in sehr geringem Grade aufnehmen wird, vom Herrn Zöllner selbst beobachtet wurde. Ausserdem müsste ja diese Resorption, also auch die Bewegung einmal doch ein Ende nehmen, was nicht geschieht. Auch bin ich der Ansicht, dass man eher zu erwarten hätte, dass der erwärmte Draht Gase ausscheiden und nicht aufnehmen wird.

Ich wäre geneigt, die Ursache dieser Umkehrung in der dielektrischen Polarisation und dem Elektrischwerden der Glimmerblättchen zu suchen. Der von einem Strome durchflossene Draht wird an seiner Oberfläche freie Elektricität besitzen, welche auf die Glimmerblättchen vertheilend wirkt und die zugewendeten Seiten elektrisch macht.

Wie indessen aus dieser elektrischen Wirkung des Platinringes ein gegen die Oberfläche des Blättchens normal gerichteter Zug, der das letztere in anormaler Richtung treibt, resultirt, darüber weiss ich nichts Bestimmtes anzugeben, bin aber nichtsdestoweniger von dem elektrischen Ursprung dieser Bewegung fest überzeugt. Dafür scheint mir folgendes Experiment zu sprechen. Wird der eine Pol des Inductionsapparates mit dem Platinring verbunden, und der andere zur Erde abgeleitet, und ist der Druck im Radiometer so gross, dass bei Anwendung des galvanischen Stromes eine anormale Rotation stattfinden müsste, so rotirt das Kreuz ebenfalls in anormaler Richtung, mag der positive oder negative Pol zur Erde abgeleitet sein.

Ist die Wirkung der dielektrischen Polarisation schwächer, als die ihr entgegengesetzte Wirkung der Luftströmungen, so findet eine normale Rotation nach Zöllner's Angaben von 760—10 Mm. statt.

Wird der galvanische Strom unterbrochen, während das Radiometer in anormaler Richtung rotirt, so findet eine Umkehrung und Drehung desselben in normaler Richtung statt. Diese Drehung wird durch Luftströmungen veranlasst und dauert nur kurze Zeit, da der Draht sich bald abkühlt.

Bei hohen Verdünnungsgraden tritt noch eine neue Ursache der Bewegung hinzu, nämlich die strahlende Wärme, deren Wirkung der der dielektrischen Polarisation ebenfalls entgegengesetzt ist. In Folge grosser Verdünnung wird der Draht glühend

und der Strom schwächer und daher auch die Glimmerblättchen schwächer elektrisch. Die strahlende Wärme des Platinringes erwärmt die Glimmerblättchen an den zugewendeten Seiten und die Reaction der stärker zurückprallenden Moleküle auf die Glimmerblättchen wird die letzteren in normaler Richtung zu drehen suchen. Da ausserdem auch vom Platinring warme, d. h. mit grossen Geschwindigkeiten begabte Gasmoleküle herausfahren und einen Theil ihrer lebendigen Kraft durch Stösse auf die Flügel in gleichem Sinne übertragen, so wird auch dadurch die normale Drehung verstärkt.

Man hat sich somit eine dreifache Ursache der Bewegungserscheinungen im Zöllner'schen Radiometer zu denken. Luftströmungen und Wärmestrahlung suchen die Blättchen in normaler und die Wirkung der dielektrischen Polarisation in anormaler Richtung zu drehen. Die Luftströmungen nehmen mit der Verdünnung ab, es überwindet die Wirkung der dielektrischen Polarisation und es findet die erste Umkehrung bei 10 Mm. statt. Mit fortgesetzter Verdünnung nimmt die Erwärmung des Drahtes in Folge geringerer Wärmeleitung des Gases zu, und die Intensität des Stromes, also auch das Elektrischwerden der Glimmerblättchen ab, und da auch gleichzeitig die Wärmestrahlung zunimmt, so wird die Wirkung der letzteren bei einem bestimmten Druck, ungefähr 0·02 Mm., überwunden und es findet nach einer zweiten Umkehrung eine normale Rotation statt.

Wenn es gelingt eine Wirkung, z. B. die Wärmewirkung dadurch zu eliminiren, dass man den Platinring durch einen dicken Kupferring ersetzt, so ist zu erwarten, dass die erste Umkehrung schon bei grösserem Drucke als 10 Mm. und die zweite vielleicht gar nicht eintreten wird.

Würde dieser Versuch, den ich demnächst auszuführen gedenke, sich experimentell bestätigen, so wäre er ein indirecter Beweis für die Richtigkeit der gegebenen Erklärung durch Elektrischwerden der Glimmerblättchen.